



TITLE:

# Multiphase fluid flow in porous media and its effect on seismic velocity( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Yamabe, Hirotatsu

---

CITATION:

Yamabe, Hirotatsu. Multiphase fluid flow in porous media and its effect on seismic velocity. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18938>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工 学）	氏名	山邊 浩立
論文題目	Multiphase fluid flow in porous media and its effect on seismic velocity (多孔質媒質中における多相流体流動及び地震波速度へ与える影響に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は二酸化炭素の地下貯留において重要となる多孔質媒体中における多相流体流動への理解、ならびに地震波速度へ多相流体流動が与える影響の詳細な理解を目的とし、数値計算による検討を行った結果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文で研究対象とした、二酸化炭素の地下貯留における課題について述べている。この中で、本研究の対象となる二酸化炭素/水の多孔質媒体中での置換現象及びそれに対する物理化学的説明、更に間隙流体置換に伴う地震波速度変化について、既往の研究で示されてきた成果と課題について述べ、本研究の位置付けを明確にしている。</p> <p>第2章では、流体シミュレーションを行う際に用いた格子ボルツマン法について、数値流体力学の中での位置付け及びその理論・アルゴリズムについて詳述している。加えて二酸化炭素/水の流動を解析するために必要となる多相格子ボルツマンモデルの概要、本研究で用いた色付粒子モデルの理論について述べている。更に、色付粒子モデルの欠点である界面近傍での非物理的渦を低減するために提案されている改良アルゴリズムについて詳述している。</p> <p>第3章では、二酸化炭素/水の置換が岩石の地震波速度へ及ぼす影響を検討するために行なった波動シミュレーションについて、その理論を述べている。多くの場合、支配方程式となる応力-粒子速度の式はスタガード格子上で差分展開されて解かれるが、一般的なスタガード格子では、対象となる媒質に強い不均質性がある際に数値誤差・発散が生じてしまうことが知られている。そこで本研究では回転スタガード格子（Rotated Staggered Grid）を用いることとし、その理論についても本章で述べている。</p> <p>第4章では、岩石モデルについて述べている。本研究では、岩石物理学において用いられるモデルの一つである、堆積岩の形状を模した粒子充填モデルに着目し、これを作成してシミュレーションに適用した。本章では、この粒子モデルを考える上で重要となる、ソーティングと呼ばれる岩石中に含まれる鉱物粒子サイズのばらつきを示す物理量の定義、岩石モデルを数値的に作成する際に用いた個別要素法の理論を述べている。更に本章では、作成した岩石モデルの基本的な物理的性質について、数値シミュレーションを用いて計算を行った。</p> <p>第5章では、水飽和な岩石モデルに対する二酸化炭素圧入に伴う流体置換について、格子ボルツマン法を用い、シミュレーションを行なった。ここでは粘性力と毛管圧力の比であるキャピラリ数と呼ばれる無次元数に着目し、これを <math>10^{-5}</math> から <math>10^{-3}</math> のオーダー</p>			

京都大学	博士（工 学）	氏名	山邊 浩立
<p>ーで変化させケーススタディを行なった。シミュレーション結果から、高いキャピラリ数の領域では Viscous Fingering が、低いキャピラリ数の領域では Viscous Fingering と Capillary Fingering のクロスオーバーが支配的な置換メカニズムとして観察された。更に、低キャピラリ数の領域においては、間隙スケールでの現象として知られる Haines ジャンプが観察された。本研究では、二酸化炭素地下貯留における貯留層評価や圧入効率において最も重要となる二酸化炭素の平衡飽和度に対し、Haines ジャンプが及ぼす影響について議論を行なった。本研究で観察された Haines ジャンプは前進型（方向が圧入方向と同方向であるもの）と後進型（方向が圧入方向と逆方向であるもの）の二種類に分類され、二酸化炭素の飽和度は前進型の Haines ジャンプが発生するときに非常に低い値を示すことがわかった。</p> <p>第 6 章では、格子ボルツマンシミュレーションにより得られた間隙中の二酸化炭素/水の分布をもとに、有限差分による波動シミュレーションを用いて地震波速度の変化を評価した。結果として、二酸化炭素圧入に伴う地震波速度の線型な減少が観察された。更に、岩石モデル中に二酸化炭素と水をランダムに配置し、これについても波動シミュレーションを行い、二酸化炭素と水の流体分布が地震波速度に及ぼす影響を検討した。その結果、二酸化炭素の飽和度に対する地震波速度の関係は格子ボルツマンシミュレーションにより求められた分布状態とランダム配置した状態とで大きく差があることが確認され、この差について部分飽和と均質飽和という 2 種類の概念を導入することにより議論を行なった。これにより、本研究で考慮した高周波の波動伝播においては、二酸化炭素の圧入に伴う地震波速度の応答は部分飽和となることがわかった。更に、本研究の成果は有限差分波動シミュレーションによる地震波速度の評価が妥当であることをも示しており、格子ボルツマン法及び有限差分法による波動シミュレーションを組み合わせることで、間隙というミクロなスケールでの多相流体分布を考慮に入れた地震波速度の定量的な評価を行うことに成功した。</p> <p>第 7 章は全体の結論であり、本論文で得られた成果について要約している。この中で、ミクロスケールでの二酸化炭素/水置換現象を考察することによる間隙スケールでの流動の重要性の議論、ならびに波動シミュレーションを行なうことで、これまで困難とされてきた間隙スケールでの流体の分布を考慮した地震波速度の評価に成功したと結論付けている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、地球温暖化対策の一つである二酸化炭素地下貯留において重要となる、地下岩石中での $\text{CO}_2$ /水の二相流体の挙動及び流動現象が地震波速度へ与える影響の評価を目的としている。得られた成果の概要は以下のとおりである。

1. 粒子充填による岩石モデルを個別要素法により作成し、これに対し数値計算を行うことで、浸透率や弾性波速度といった岩石物理学的パラメータの評価を行った。
2. 水飽和な岩石に対し超臨界  $\text{CO}_2$  を圧入する際の流体置換について詳細に検討するため、上記の粒子充填モデルに対し二相流モデルを組み込んだ格子ボルツマン法を適用し、シミュレーションを行った。この際、二相流動現象において重要な無次元パラメータとなるキャピラリー数を変化させてケーススタディを行い、キャピラリー数変化に伴う流動の変化を示した。
3. 格子ボルツマン法を用いた流体シミュレーションにより、間隙中で超臨界  $\text{CO}_2$  が水と置換する際、高キャピラリー数条件下においては Viscous Fingering が卓越し、低キャピラリー数においては Viscous Fingering と Capillary Fingering のクロスオーバーが卓越することが示された。更に、低キャピラリー数条件下では Haines Jump と呼ばれる間隙スケールでの流動現象が観察された。
4. 二酸化炭素地下貯留における貯留層評価を行う上で重要となる  $\text{CO}_2$  飽和度に対し、Haines Jump が及ぼす影響について評価を行った。この結果、圧入方向に対し逆方向に流動する Haines Jump が観察される場合には  $\text{CO}_2$  飽和度が大きく増加し、逆に圧入方向に沿って流動する Haines jump が観察される場合には  $\text{CO}_2$  飽和度の変化が少ない傾向が見られた。これは、間隙スケールでの現象が岩石コアスケールでの飽和度に大きな影響を与える可能性を示唆するものである。
5. 格子ボルツマン法により得られた流体分布の情報をもとに、有限差分法による波動シミュレーションを行うことで、 $\text{CO}_2$  飽和度と地震波速度の関係を評価することに成功した。更に上記の流体分布条件とは別に、岩石モデル中に  $\text{CO}_2$  と水をランダムに配置し地震波速度を評価したところ、得られた  $\text{CO}_2$  飽和度と地震波速度との関係と上記の条件下で得られた関係には明確な差が存在することが確認された。

以上、本論文では、岩石モデルに対し格子ボルツマン法及び有限差分法による波動シミュレーションを行うことで、間隙スケールでの流体挙動が  $\text{CO}_2$  の飽和度や地震波速度に及ぼす影響を定量的に評価することに成功した。本研究の成果は、二酸化炭素地下貯留において大きな課題となっている  $\text{CO}_2$  と水の挙動解明とモニタリング精度向上に対して今後広く利用される事が期待され、学術上、実生活上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。また平成 27 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規定第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。